

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.019

杨广辉, 李红岭, 张华, 等. 马铃薯品质无损检测技术的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 161-169.

YANG G H, LI H L, ZHANG H, et al. Research progress on non-destructive detection techniques for potatoes quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 161-169.

马铃薯品质无损检测技术 的研究进展

杨广辉, 李红岭✉, 张华, 李辉, 刘小龙, 贾尚云, 胡博, 尚奕博

(甘肃农业大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:“十四五”以来,随着“三农工作”的不断深化,马铃薯品质检测和产品分级对马铃薯产业扩大及加工行业的发展起到了决定性作用。针对传统依靠人工进行马铃薯品质分类劳动强度大、效率低、易造成二次损伤且无法判别内部品质等问题,围绕无损检测技术阐述了国内外高光谱、近红外光谱、机器视觉、超声波等检测技术在马铃薯品质检测应用中的研究进展。通过研究分析,提出马铃薯品质无损检测技术面临的问题,对优选成像系统、多模态检测技术、算法优化、智能化检测技术进行展望,为马铃薯品质无损检测技术的深入研究和实际应用提供借鉴。

关键词:马铃薯;无损检测;高光谱技术;机器视觉;近红外技术;超声波技术

中图分类号: TP79; S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)06-0161-09

网络首发时间: 2024-11-08 09:05:20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20241107.1455.018>

Research Progress on Non-destructive Detection Techniques for Potatoes Quality

YANG Guang-hui, LI Hong-ling✉, ZHANG Hua, LI Hui, LIU Xiao-long,
JIA Shang-yun, HU Bo, SHANG Yi-bo(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural
University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Since the “14th Five-Year Plan”, with the continuous deepening of the “three rural work”, the quality inspection and grading of potatoes have played a decisive role in the expansion of the potato industry and the development of the processing industry. Aiming at the problems of traditional manual potato quality classification, such as high labor intensity, low efficiency, easy to cause secondary damage, and inability to judge internal quality, this article elaborated on the research progress of domestic and foreign hyperspectral detection technology, near-infrared spectroscopy detection technology, machine vision detection technology,

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 甘肃农业大学技术转让横向项目 (GSAU-JSZR-2024-004); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2024CYZC-32); 甘肃农业大学校内自列项目 (701-0722045)

Supported by: Gansu Agricultural University Technology Transfer Project (No. GSAU-JSZR-2024-004); Gansu Provincial Department of Education Industry Support Program (No. 2024CYZC-32); Gansu Agricultural University Self-listed Project (No. 701-0722045)

第一作者: 杨广辉, 男, 1999年出生, 在读硕士生, 研究方向为图像识别与信息处理, E-mail: 1721630071@qq.com

通信作者: 李红岭, 女, 1986年出生, 硕士, 高级实验师, 研究方向为农业电气化与自动化, E-mail: 451462291@qq.com

and ultrasonic detection technology in the application of internal and external quality detection of potatoes. Through research and analysis, the problems facing non-destructive detection technology for potato quality were proposed, and prospects for the selection of imaging systems, multimodal detection technology, algorithm optimization, and intelligent detection technology were discussed, which could provide a reference for in-depth research and practical application of non-destructive detection technology for potato quality.

Key words: potato; non-destructive testing; hyperspectral technology; machine vision; near-infrared technology; ultrasonic technology

随着马铃薯主粮化战略的推进,截至 2023 年 9 月,全国马铃薯种植面积在 $4.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 左右、马铃薯产量多年稳居世界第一。随着马铃薯产量的增大,马铃薯的产品分类及深度加工的发展不足问题突显,传统马铃薯分类主要依靠于人工挑选,费时费力且无法判断马铃薯内部品质的优劣,利用无损检测技术对马铃薯进行品质检测不仅可以避免二次损伤和食品加工中出现质量问题,也可以节省大量人力物力。

无损检测广泛应用于农作物产量估计、农作物品质检测、水质检测、人工识别、气体监测等方面^[1]。品质检测是马铃薯农业生产中的重要环节,文章主要围绕马铃薯品质的无损检测技术对马铃薯进行品质分级和物质含量检测,通过对研究现状进行归纳分析,对当前无损检测技术在马铃薯品质检测中的缺陷进行优化及未来发展做出展望。

1 马铃薯品质的高光谱检测技术

高光谱成像技术是一种多窄波段的影像数据技术,集中了光学、光电子学、电子学、信息处理、计算机科学等领域的技术,是传统的二维成像技术和光谱技术结合的新兴技术^[2]。高光谱成像技术具有多波段、窄波段、光谱范围广(200~2 500 nm)和图像合一的特点^[3]。

高光谱成像技术在马铃薯品质检测中利用二维几何空间和一维光谱信息结合,主要用于品质分级、理化指标测定、真菌感染检测和缺陷识别^[4],高光谱成像系统如图 1 所示。

针对马铃薯外部品质分级问题,Ahmed 等^[5]采用主成分分析法结合不同缺陷马铃薯的光谱特征,以 540 nm 为中心、480 nm 和 600 nm 作为差分波段的均匀二次差分方法,针对马铃薯干腐、

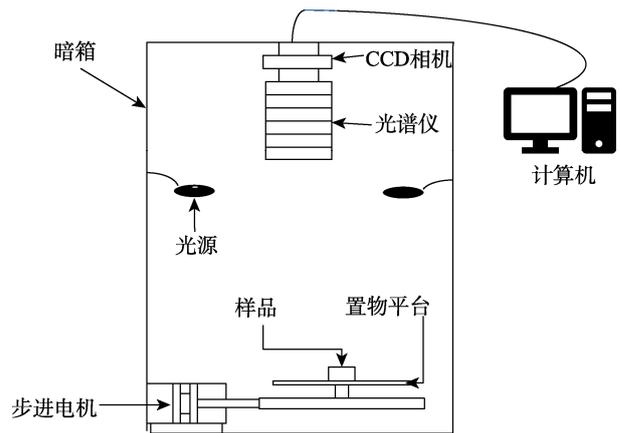


图 1 高光谱成像系统
Fig.1 Hyperspectral imaging detection system

绿皮、发芽、表皮碰伤、机械损伤、孔洞的平均识别率为 96.65%。邓建猛等^[6]通过连续投影算法及加权权重算法优选出了 13 个和 9 个特征波段,针对两种不同方法得出的特征波段建立支持向量机判别模型,两种方法对预测集的判别准确率均为 100%、支持向量机判别模型对校正集的交叉验证率为 99.5%。Ji 等^[7]采用均衡化增强图像预处理方法,用二级离散小波变换得到图像灰度共生矩阵,采用网格搜索法和 AdaBoost-Fisher 算法寻找灰度共生矩阵的最优参数,马铃薯损伤识别率为 99.82%。李鸿强等^[8]通过建立 bp 神经网络和支持向量机模型,种薯平均识别率为 77.78% 和 87.23%。杨森等^[9]提出了 Xception 深度卷积网络,针对马铃薯外部品质的在线分级,通过 Xception 深度卷积网络设计了 5 类马铃薯预训练模型,利用迁移学习得到马铃薯外部缺陷识别模型,识别准确率为 96.04%。吴向伟^[10]采集 387~1 035 nm 高光谱图像来识别冻伤、撞伤、机械损伤和正常马铃薯,通过比较光谱预处理方法选择中值滤波预处理方法,将 439.9 nm 波长作为特征变量,其中使用的 LR+Light GBM 达到最高的判别精度为

98.86%。Yamin 等^[11]对各种缺陷类型的马铃薯进行检测,采用 K-means 聚类方法对图像进行分割,光谱识别准确率高达 90%;通过建立支持向量机模型进行分类,对于建模中未涉及的马铃薯样品,采用 K-means 聚类方法对图像进行分割,分割后提取各区域的光谱输入模型进行识别,测试准确率高达 90%。

马铃薯的内部品质检测主要涉及理化指标测定及内部缺陷的检测,通过检测分级使马铃薯的种植效益和经济效益最大化。Yang 等^[12]开发了基于光谱图像结合改进的 YOLOv3-minor 模型,实现了马铃薯多类型缺陷的自动检测与分类,在 YOLOv3-small 网络中引入 Res2Net 模块,开发多类型缺陷网络检测模型,对马铃薯多类型缺陷的平均检测精度最高达到 90.26%。Wang 等^[13]采用竞争性自适应重加权选择算法、逐次投影算法建立偏最小二乘回归模型,确定系数为 0.902 0、预测均方根误差为 2.06,通过标准正态变量变换预处理构建的全谱模型性能最好。Gerrit 等^[14]针对马铃薯病毒检测设计了全卷积神经网络,通过训练好的网络用不同的马铃薯品种进行了验证且与常规疾病评估相比,精确度和召回率分别超过 0.78 和 0.88。Gao 等^[15]针对斑马薯片疾病无损检测的分级方法,使用偏最小二乘判别分析进行建模,通过可变重要性投影方法进行波段优化,最佳波段使 ZC 识别的准确率为 89%、马铃薯检测的准确率为 92%。姜微等^[16]在检测马铃薯还原糖含量中采用竞争性自适应重加权选择算法的基础上结合连续投影算法,通过选择特征波长与方法比较,基于连续投影算法的竞争性自适应重加权算法(CARS-SPA)筛选波段效果最佳,验证集模型 R^2_p 提高 0.050 1、RMSEP 下降 0.026 8、CARS-SPA 结合无损检测技术检测马铃薯还原糖含量方法可行。

针对不易发现的马铃薯内部缺陷检测,张凡等^[17]为了实现马铃薯干腐病潜育期的识别,进行不同腐败程度马铃薯对比实验,通过建立卷积神经网络模型,并对网络结构进行优化。对比分析不同模型的预测结果,筛选出最优网络层模型为 Model_3_3,优化得到 Model_0.0001 识别效果

最好,其总体准确率、精度、灵敏度和特异性分别为 99.68%、99.76%、98.82%、99.54%。李鸿强等^[18]进行马铃薯干腐和疮痂病识别分类,通过主成分分析,采用贝叶斯分类器和现行判别识别分析,正常、干腐、疮痂识别率分别为 100%、97.6% 和 100%。郭红艳等^[19]针对马铃薯环腐病的识别,建立了基于 MSC 的 LDA 模型,用马氏距离-LDA 法建立的马铃薯环腐病判别模型效果最佳,校正集、验证集正确识别率为 100% 和 93.33%。张小燕等^[20]提出了马铃薯环腐病的 SIMCA 识别模型,利用主成分分析的簇类独立软模式法进行区别,环腐病检测准确率为 87.50%。Qi 等^[21]通过结合二维卷积神经网络和三维卷积神经网络与深度协作注意力网络(PLB-2D-3D-A),提出采用高光谱图像的深度学习分类架构来检测马铃薯晚疫病;利用 2D-CNN 和 3D-CNN 提取丰富的光谱空间特征,得到全波段的精度为 73.9%,特定波段的精度为 79.0%。

综上所述,高光谱成像技术主要用于马铃薯外部品质分级,内部物质含量检测和马铃薯内、外部病害识别。高光谱成像技术有连续多波段、光谱分辨率高的特点,因此在农产品无损检测中准确率较高,适用于马铃薯品质无损检测的技术研究,但其成本较高、结构复杂、对环境要求严格,在农业生产中普及成本较高、难度较大。

2 马铃薯品质的近红外检测技术

近红外光可以实现马铃薯快速、准确地检测和分类。近红外光技术在马铃薯行业中潜力巨大,可以进一步加强研究和应用,以提高生产效率和品质。基于近红外检测技术的马铃薯品质检测,主要涉及营养理化指标测量和外部品质分类,可实现对样品多种成分的在线同时检测^[22]。

Zhao 等^[23]采用连续投影算法、随机青蛙算法和遗传算法对马铃薯淀粉含量预测,结果表明:在随机青蛙算法中,校正集的均方根误差和预测集的均方根误差为 0.87 和 0.84, RMSEC 和 RMSEP 分别为 0.33 和 0.30%,马铃薯淀粉预测模型特征波长的最佳方法是随机青蛙算法。杨海波等^[24]通过理化指标反演光谱指标模型,预测马铃

薯植株中氮元素的含量,通过数据预处理和特征波长选择后,调整径向基函数的惩罚系数 c 和核系数 g ,建立并优化了支持向量回归 (SVR) 的预测模型,通过优化的 SVR 模型准确预测马铃薯植株氮含量,实验方法具有可行性。李梦瑶等^[25]研究不同种类淀粉快速无损定性及定量检测方法,结合主成分分析法建立不同种类淀粉的定性判别模型和基于偏最小二乘法建立近红外定量分析模型,校正模型和预测模型的决定系数分别为 0.998 8 和 0.998 2、均方根误差分别为 0.385 和 0.347、预测相对分析误差为 14.3,结果表明此方法具有可行性。孟庆琰等^[26]探索马铃薯全粉蛋白质含量,通过建立全波段、特征波段和特征波长下的主成分回归及偏最小二乘法预测蛋白质模型,经过多元散射校正处理后的光谱建模效果最好,相关系数和均方根误差分别为 0.969 3、0.293 7 和 0.977 9、0.330 4,结果表明特征波长优于全波段和特征波段建立的模型。陈钊庆^[27]针对淀粉含量预测模型,通过全波段筛选并使用竞争性自适应加权算法,得到确定系数为 0.889 7、预测均方根误差为 0.843 1;针对糖度检测模型采用竞争性自适应加权算法,得到确定系数和预测均方根误差分别为 10.917 9、0.150 9,实验方法具有可行性。

关于马铃薯病害的检测, Ainara 等^[28]关于马铃薯的黑斑病,利用可见近红外和短波红外构建分类器,构建偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 模型检查可见近红外 (Vis-NIR) 和短波红外 (SWIR) 高光谱系统的潜力,提出高光谱成像技术结合化学计量方法的病害检测技术,在此基础上研究了 Vis-NIR 和 SWIR 高光谱系统,多变量的主成分分析法 (SIMCA-PCA) 和 PLS-DA 模型鉴定了马铃薯中的黑斑病,总体正确分类率达 94%, SWIR 检测黑斑病的效果更优,结果更准确。丁继刚等^[29]为了检测淀粉含量,建立偏最小二乘法定量预测模型,黑心马铃薯 PLS-DA 模型的校正集和验证集的检测正确率分别为 97.74% 和 98.33%,总判别正确率为 97.89%。针对马铃薯的斑病 Pei-shin 等^[30]建立偏最小二乘法回归模型,使用近红外光谱构建的分类器在交叉验证中实现了 97% 的区分度。苏文浩等^[31]利用主成分分

析法,选取 990、1 026、1 109、1 226、1 285、1 464、1 619 nm 波长为特征波长用于马铃薯外部缺陷的分级,正确识别率达到 71.25%,为提高识别率,在此基础上提出了波段比算法并与特征波长主成分分析法相结合,正确识别率达到 97.08%。Shin 等^[32]针对马铃薯黄萎病,将近红外光谱和机器学习相结合建立人工神经网络,对马铃薯早期黄萎病的识别准确率为 94.7%。韩亚芬等^[33]开发了一种马铃薯黑心病的快速无损检测技术,通过建立 PLS-DA,并利用主成分分析光谱形态结合的方法选择特征波长和优化模型,结果表明基于 PLS-DA 法建立的马铃薯黑心病判别模型识别总正确率能够达到 97.16%。

上述表明,基于近红外的马铃薯品质无损检测主要用于马铃薯含水量、淀粉含量、固态物、蛋白质含量预测以及各类病害的识别。马铃薯全透射光谱因样品大小不同会导致光谱受光程的差异影响较大,在马铃薯外部品质分级中受检测样本的限制,分级准确性较低。研究主要以内部物质含量检测为主,外部品质分级主要以实验研究为主,近红外检测为马铃薯的品质分级奠定了理论研究基础。

3 马铃薯品质的机器视觉检测技术

机器视觉技术是一种利用计算机成像设备模拟人类视觉对图像进行感知、识别的技术,如图 2 所示。机器视觉技术在农产品品质预测与控制、风味分析、预测与优化、智能化加工和自动识别领域具有实用价值和研究价值^[34]。

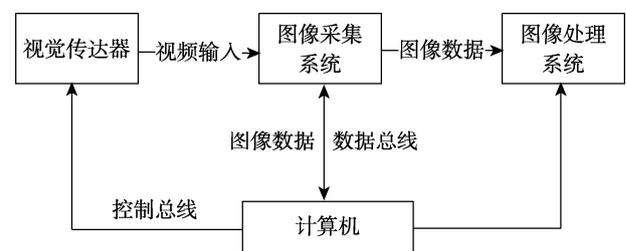


图 2 机器视觉系统

Fig.2 Machine vision systems

基于机器视觉来识别马铃薯的形状和大小, Shen 等^[35]提出支持向量机的机器视觉算法,通过对比 4 种支持向量机函数的效果,得到基于多项

式核的 SVM (支持向量机模型) 更适合判别马铃薯的形状, 准确率为 88.89%; 基于线性核的 SVM 更适合估算马铃薯的大小, 准确率为 87.41%。Su 等^[36]通过获得 3D 空间中的质量和质量预测相关的数据, 使用图像处理算法对深度图像的外观质量进行分级, 此外通过结合 2D 和 3D 空间中的表面数据、凹凸和空心缺陷等检测的外观质量分级达到 88%。熊俊涛等^[37]利用感知器学习算法区分马铃薯, 利用边缘检测法结合 K-最近邻分类算法识别马铃薯, 图像检测边缘通过中值滤波结合面积最大法识别马铃薯表皮的损伤部位, 绿皮、损伤、发芽、正常马铃薯的识别准确率分别为 89.7%、90.4%、96%、96.8%。傅云龙等^[38]提出机器视觉与 YOLO 算法结合的马铃薯表面缺陷检测方法, 通过二分 K 均值聚类算法进行聚类分析, 平均识别率达到 99.46%; 腐烂、发芽、机械损失、虫眼、病斑检测的精度均高于 98%, 可以快速有效区分马铃薯表面缺陷。Afshin 等^[39]结合机器视觉和人工神经网络方法识别和区分马铃薯品种, 通过特征参数和主特征区分马铃薯品种, 采用线性判别分析和非线性人工神经网络方法对数据分类, 马铃薯品种判别分析准确率分别为 73.3%、93.3%、73.3%、40%、73.3%、66.7%、80%、40% 和 53.3%; 采用神经网络分析方法, 所有品种的正确分类率为 100%, 提升效果显著。

Tian 等^[40]提出利用马铃薯的不同透射率来区分马铃薯的正常心和黑心, 通过算法对图像进行处理和分析透射图像的灰度值变化规律, 可以实现马铃薯黑心的检测。赵建敏等^[41]研究马铃薯病害识别, 通过 OTSU 算法 (最大类间方差法) 利用 SVM 分类器进行特征识别, 通过 Web Service 与客户端连接构建识别系统, 能够精准识别主要病害且识别率均大于 92%。王奕^[42]采用分块自适应检测结合小波变换法进行马铃薯内部病虫害图像识别, 识别病虫害准确率接近 90%。张兆国等^[43]提出对马铃薯进行识别检测并快速获取损伤情况的机器学习模型, 使用改进 YoloV4 检测模型完成特征提取, 基于卷积神经网络的深度学习方法相比于传统 Open-CV 识别提高了马铃薯识别精度, 平均准确率达到 91.4%。刘浩等^[44]设计

了基于机器视觉的马铃薯在线分级与缺陷检测系统, 采用 RGB 模型进行数据分析, 以马铃薯图像设定的阈值与标准差值相比较, 对不同类别大小的马铃薯分级有较高的准确度。许伟栋等^[45]提出基于高通滤波的机器视觉检测方法, 利用 H 分量图像分割算法得到马铃薯灰度图, 通过与快速傅里叶变换后的马铃薯灰度图做卷积, 通过 Blob 分析筛选得到目标区域, 该方法能够较准确识别马铃薯缺陷, 总识别率达 95%。

上述表明, 基于机器视觉的马铃薯品质无损检测容易实现马铃薯外部品质分类, 如绿皮、机械损伤、发芽、腐烂、虫眼等, 且准确率随着算法的研究发展随之提高, 为马铃薯品质检测和分级提供理论基础。虽然基于机械视觉的马铃薯内部品质检测建模较难但技术发展较快, 成本较低且具有良好的发展前景。

4 马铃薯品质的超声波检测技术

基于超声波的马铃薯品质检测是利用超声波在马铃薯中传播的特性, 结合传感器和数据处理技术, 对马铃薯进行非破坏性的检测和评估的技术手段, 如图 3 所示, 通常用于检测马铃薯的内部品质检测和分级。

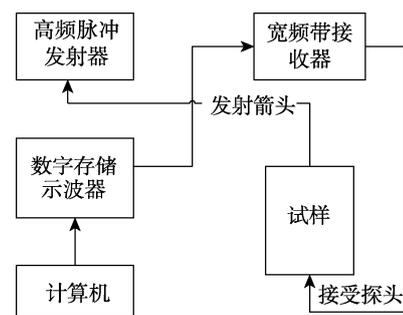


图 3 超声波检测系统

Fig.3 Ultrasonic testing system

Beyaz 等^[46]借助 LabVIEW 平台开发的马铃薯分类软件进行数据采集, 并展示不同大小的马铃薯分类方法的效率, 静态超声波传感器长度测量与动态超声传感器长度测量之间的回归为 87.9%, 马铃薯分类的卡钳长度测量与静态超声传感器长度测量之间的回归为 95.5%。Sutrisno 等^[47]通过超声波特征检测内部损伤, 使用频率 50 kHz 的超声波测量设备进行超声波表征测试, 得到线

性判别模型,能有效区分健康和受感染的紫薯且判别准确率高达 85.71%。Adele 等^[48]研究基于超声波的智能系统区分马铃薯和土块,采用反向传播算法的多层感知神经网络进行模式识别,选择了 17 个潜在的判别特征,并将其提供给人工神经网络模型,根据均方误差、正确检出率和相关系数选择最优网络,马铃薯和土块识别率约为 97.3% 和 97.6%。Konrad 等^[49]使用超声波技术检测淀粉胶,为快速估计密度和浓度提供经验模型,考虑淀粉浓度为 1% 至 5% 的胶体的 5 个温度(20、25、30、35 和 40 °C)。模型可以根据声速测量快速计算给定温度下的马铃薯淀粉胶体密度,对特定频率(10 MHz)的相对误差为 0.15%,甚至 0.09% 是所考虑方法的最高精度。

超声波对于马铃薯品质的无损检测主要应用于马铃薯的区分和内部品质,为检测马铃薯加工食品中的酶、营养元素等提供便利的检测方式。目前超声波在马铃薯品质检测中发展效果较好,但其对环境和设备技术要求是普及的重要阻碍。

5 问题与展望

5.1 马铃薯品质无损检测技术面临的问题

近年来,无损检测技术发展迅速且取得了显著的成果。综合已有文献^[50-52]主要从高光谱技术、近红外技术、机器视觉、超声波检测 4 个方面介绍马铃薯品质的无损检测技术,结合国内外发展现状,无损检测技术在马铃薯品质检测中面临以下问题:

(1) 针对任意放置和土块粘连的马铃薯进行检测分级,很难进行准确检测达到分级的目的。虽然 Wang 等^[53]、李玉华等^[54]提出了三维层面的马铃薯模型,但算法不成熟且难度技术过高。

(2) 高光谱分选仪成本过高及对于环境的要求严格,因此在实际的农业生产中普及受限;近红外透射光谱因样品大小不同导致光谱受光程的差异影响较大,对外部缺陷检测精分级的精确度不高;机器视觉对于马铃薯外部品质分级虽然容易实现,但对于内部物质含量检测建模困难、技术复杂且对环境光线要求严格;超声波对马铃薯品质检测在于马铃薯的检测分级和内部的结构和

性能,因设备技术和环境限制实际效果不佳。

(3) 农业生产对于机器的实时性有严格的要求,然而遥感数据扫描缓慢且数据量大,还面对着复杂的地形要求、这就务必对机器的性能和算法的通用性提出挑战,在农业生产中会遇到阻碍。

(4) 无损检测技术在实践中的应用较少,虽然无损检测技术逐渐成熟,但其配套设施发展缓慢且需要人工进行操作,不仅耗费大量人力物力也会使得检测准确率降低。

5.2 马铃薯品质无损检测技术发展建议

随着马铃薯主粮化战略的推进,无损检测技术在食品检测领域会逐步走向成熟且体系更加完善。以国内外无损检测技术发展现状结合粮食初加工机械化水平研究现状^[55-56],建议在马铃薯无损检测研究中考虑以下方面:

(1) 优选成像系统。马铃薯的品质检测对于食品加工行业必不可少,但在考虑高光谱检测技术的数据冗余、处理较为复杂且成像速度较慢,在实际生产中很难满足实时在线的检测需求,农业生产中可以用多光谱分选仪代替,降低成本的同时增加光谱的可选择性。

(2) 多模态无损检测技术。单一的无损检测技术在农业生产中存在不同的缺陷,结合多种无损检测技术可以有效规避问题,如结合机器视觉和近红外光谱成像技术,在保证系统快速、稳定、准确检测内部物质含量的同时进一步提高外部缺陷检测分级的精确性,且在保证速度的前提下能提升分级的准确性和提高机器工作效率,使马铃薯分级装置更加灵活。

(3) 优化算法与信息处理设备。将机器学习算法应用于无损检测数据分析,可以提高对马铃薯品质的判断准确性。在准确率保证的基础上基于云平台技术,将无损检测数据上传至云端进行分析处理,加速数据处理和分析速度、实现数据共享和远程协作,完成马铃薯品质的在线分级。

(4) 发展智能化无损检测技术。利用人工智能和大数据分析技术,结合食品检测机械化实现对大量马铃薯进行快速、准确地检测和分类。加强与农业生产主体的合作,建立数据共享平台,整合各方资源和信息,共同推动马铃薯无损检测

技术的发展和推广应用。

参考文献:

- [1] SAINI R, KAUR S, AGGARWAL P, et al. Conventional and emerging innovative processing technologies for quality processing of potato and potato-based products: a review[J]. *Food Control*, 2023, 153.
- [2] 张红涛, 赵鑫涛, 谭联, 等. 显微高光谱成像技术在生物学检测中的研究与进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(8): 2348-2353.
- ZHANG H T, ZHAO X T, TAN L, et al. Research and progress of microscopic hyperspectral imaging technology in biological detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(8): 2348-2353.
- [3] 韩岷杰, 王相友, 许英超, 等. 马铃薯近红外光谱无损检测影响因素研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 37-42.
- HAN M J, WANG X Y, XU Y C, et al. Research on influencing factors of nondestructive detection of potato near-infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral*, 2023, 43(1): 37-42.
- [4] 熊春晖, 余永新, 焦逊, 等. 高光谱成像技术在农产品无损检测中的应用[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(1): 109-122.
- XIONG C H, SHE Y X, JIAO X, et al. Application of hyperspectral imaging technology in nondestructive testing of agricultural products[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2023, 31(1): 109-122.
- [5] AHMED M R, YASMIN J, MO C Y, et al. Outdoor applications of hyperspectral imaging technology for monitoring agricultural crops: a review[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2016, 41(4): 396-407.
- [6] 邓建猛, 王红军, 黎邹邹, 等. 基于高光谱技术的马铃薯外部品质检测[J]. *食品与机械*, 2016, 32(11): 122-125, 211.
- DENG J M, WANG H J, LI Z Z, et al. External quality detection of potato based on hyperspectral technology[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(11): 122-125+211.
- [7] JI Y M, SUN L J. Nondestructive classification of potatoes based on HSI and clustering[A]. *Proceedings of 2019 4th International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC)* [C]. IEEE、东北林业大学, 哈尔滨汇联教育科技有限公司, 2019: 5.
- [8] 李鸿强, 孙红, 李民赞. 基于高光谱的马铃薯微型种薯分类检测[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(11): 1421-1426.
- LI H Q, SUN H, LI M Z. Classification and detection of potato microseed potatoes based on hyperspectral[J]. *Journal of Analysis and Testing*, 2020, 39(11): 1421-1426.
- [9] 杨森, 冯全, 张建华, 等. 基于轻量卷积网络的马铃薯外部缺陷无损分级[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 284-289.
- YANG S, FENG Q, ZHANG J H, et al. Nondestructive grading of potato external defects based on lightweight convolutional network[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 284-289.
- [10] 吴向伟. 基于高光谱图像的马铃薯的外部品质及含水量检测[D]. 成都: 四川农业大学, 2021.
- WU X W. Detection of external quality and water content of potato based on hyperspectral image[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2021.
- [11] JI Y M, SUN L J, LI Y S, et al. Non-destructive classification of defective potatoes based on hyperspectral imaging and support vector machine[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 71-79.
- [12] YANG Y, LIU Z F, HUANG M Z, et al. Automatic detection of multi-type defects on potatoes using multispectral imaging combined with a deep learning model[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 336.
- [13] WANG F X, WANG C G, SONG S Y, et al. Study on starch content detection and visualization of potato based on hyperspectral imaging[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(8): 4420-4430.
- [14] GERRIT P, PIETER M B, HENDRICK A C, et al. Potato virus Y detection in seed potatoes using deep learning on hyperspectral images[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10209.
- [15] GAO W Q, XIAO Z Y, BAO T F. Detection and identification of potato-typical diseases based on multidimensional fusion atrous-CNN and hyperspectral data[J]. *Applied Sciences*, 20-23, 13(8): 7-16.
- [16] 姜微, 房俊龙, 王树文, 等. CARS-SPA 算法结合高光谱检测马铃薯还原糖含量[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(2): 88-95.
- JIANG W, FANG J L, WANG S W, et al. CARS-SPA algorithm combined with hyperspectral detection of potato reducing sugar content[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(2): 88-95.
- [17] 张凡, 王文秀, 王春山, 等. 高光谱图像结合卷积神经网络的马铃薯干腐病潜育期识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(2): 480-489.
- ZHANG F, WANG W X, WANG C S, et al. Identification of latent incubation period of potato dry rot based on hyperspectral image combined with convolutional neural network[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(2): 480-489.
- [18] 李鸿强, 孙红, 李民赞. 基于光谱结构特性的马铃薯干腐和疮痂病识别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(8): 2471-2476.
- LI H Q, SUN H, LI M Z. Research on identification method of potato dry rot and scab disease based on spectral structure characteristics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(8): 2471-2476.
- [19] 郭红艳, 刘贵珊, 吴龙国, 等. 基于高光谱成像的马铃薯环腐病无损检测[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 203-207.
- GUO H Y, LIU G S, WU L G, et al. Nondestructive detection of potato ring rot based on hyperspectral imaging[J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 203-207.

- [20] 张小燕, 杨炳南, 曹有福, 等. 近红外光谱的马铃薯环腐病 SIMCA 模式识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(8): 2379-2385.
ZHANG X Y, YANG B N, CAO Y F, et al. SIMCA pattern recognition of potato ring rot by near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(8): 2379-2385.
- [21] Qi C, SANDRONI M, CAIRO W J, et al. In-field classification of the asymptomatic biotrophic phase of potato late blight based on deep learning and proximal hyperspectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205.
- [22] 孙玉侠. 近红外光谱技术在粮食工业中的应用[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(1): 58-60.
SUN Y X. Application of near-infrared spectroscopy technology in grain industry[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(1): 58-60.
- [23] ZHAO J X, PENG P P, WANG J P. Nondestructive detection of potato starch content based on near-infrared hyperspectral imaging technology[J]. Open Computer Science, 2023, 13(1): 881-896.
- [24] 杨海波, 李斐, 张加康, 等. 基于高光谱指数估测马铃薯植株氮素浓度的敏感波段提取[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 541-551.
YANG H B, LI F, ZHANG J K, et al. Sensitive band extraction for estimating nitrogen concentration in potato plants based on hyperspectral index[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2020, 26(3): 541-551.
- [25] 李梦瑶, 翟晨, 王书雅, 等. 基于近红外光谱对淀粉种类的定性鉴别及定量分析[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 154-157+160.
LI M Y, ZHAI C, WANG S Y, et al. Qualitative identification and quantitative analysis of starch species based on near-infrared spectroscopy[J]. China Condiment, 2019, 44(10): 154-157+160.
- [26] 孟庆琰, 何建国, 刘贵珊, 等. 基于近红外光谱技术的马铃薯全粉蛋白质无损检测[J]. 食品科技, 2015, 40(3): 287-291.
MENG Q Y, HE J G, LIU G S, et al. Nondestructive detection of potato whole flour protein based on near-infrared spectroscopy [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(3): 287-291.
- [27] 陈钊庆. 马铃薯内外部关键品质快速无损检测与系统开发[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
CHEN Z Q. Rapid nondestructive testing and system development of key internal and external quality of potato[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023.
- [28] AINARA L M, JANOS C K, MOHAMMAD G, et al. Non-destructive detection of blackspot in potatoes by Vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2016, 70: 229-241.
- [29] 丁继刚, 韩东海, 李永玉, 等. 基于可见/近红外漫反射光谱的马铃薯黑心病及淀粉含量同时在线无损检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1909-1915.
DING J G, HAN D H, LI Y Y, et al. Simultaneous non-destructive on-line detection of potato black-heart disease and starch content based on visible/near infrared diffuse[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1909-1915.
- [30] LIANG P S, HAFF R P, HUA S S T, et al. Nondestructive detection of zebra chip disease in potatoes using near-infrared spectroscopy[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166: 161-169.
- [31] 苏文浩, 何建国, 刘贵珊, 等. 近红外高光谱图像技术在马铃薯外部缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 127-133.
SU W H, HE J G, LIU G S, et al. Application of near-infrared hyperspectral image technology in potato external defect detection[J]. Food & Machinery, 2013, 29(5): 127-133.
- [32] SHIN M-Y, GONZALEZ V C, TONGSON E, et al. Early detection of Verticillium wilt of potatoes using near-infrared spectroscopy and machine learning modeling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204.
- [33] 韩亚芬, 吕程序, 苑严伟, 等. PLS-DA 优化模型的马铃薯黑心病可见近红外透射光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4): 1213-1219.
HAN Y F, LV C X, YUAN Y W, et al. Visible near-infrared transmission spectroscopy of potato black heart disease based on PLS-DA optimization model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1213-1219.
- [34] 庞杰, 李小林, 王芹, 等. 机器学习视角下风味分子研究及其在茉莉花茶中的应用[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 74-82.
PANG J, LI X L, WANG Q, et al. Research on flavor molecules from the perspective of machine learning and its application in jasmine tea[J]. Science and Technology Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 74-82.
- [35] SHEN D, ZHANG S F, MING W Y, et al. Development of a new machine vision algorithm to estimate potato's shape and size based on support vector machine[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(3): 145-162.
- [36] SU Q H, NAOSHI K, LI M N, et al. Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 261-268.
- [37] 熊俊涛, 何志良, 汤林越. 基于计算机视觉的马铃薯外部品质检测技术[A]. 2016 中国农业机械学会国际学术年会——分会场 2: 现代食品及农产品加工科技创新论文集[C]. 中国农业机械学会、亚洲农业工程学会、中国农业机械化科学研究院, 中国机械工程学会, 2016: 1.
XIONG J T, HE Z L, TANG L Y. Potato external quality inspection technology based on computer vision[A]. 2016 International Academic Annual Conference of Chinese Society of Agricultural Machinery——Session 2: Proceedings of Modern Food and Agricultural Products Processing Technology Innovation[C]. Chinese Society of Agricultural Machinery, Asian Society of Agricultural Engineering, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Chinese Mechanical Engineering Society, 2016: 1.

- [38] 傅云龙, 梁丹, 梁冬泰, 等. 基于机器视觉与 YOLO 算法的马铃薯表面缺陷检测[J]. 机械制造, 2021, 59(8): 82-87.
 FU Y L, LIANG D, LIANG D T, et al. Potato surface defect detection based on machine vision and YOLO algorithm[J]. Machinery Manufacturing, 2021, 59(8): 82-87.
- [39] AFSHIN A, ABBASPOUR-G, NOOSHYAR, et al. Identifying potato varieties using machine vision and artificial neural networks[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(3): 618-635.
- [40] TIAN F, PENG Y K, WEI W S. Nondestructive and rapid detection of potato black heart based on machine vision technology[J]. China Agricultural Univ. (China); USDA Agricultural Research Service(United States); Auburn Univ. (United States), 2016, 9864 98640T-98640T-7.
- [41] 赵建敏, 薛晓波, 李琦. 基于机器视觉的马铃薯病害识别系统[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 198-202.
 ZHAO J M, XUE X B, LI Q. Potato disease recognition system based on machine vision[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2017, 45(2): 198-202.
- [42] 王奕. 基于机器视觉图像提取的马铃薯内部病虫害特征识别[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 151-155.
 WANG Y. Identification of internal pests and diseases in potatoes based on machine vision image extraction[J]. Food and Machinery, 2019, 35(9): 151-155.
- [43] 张兆国, 张振东, 李加念, 等. 采用改进 YoloV4 模型检测复杂环境下马铃薯[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 170-178.
 ZHANG Z G, ZHANG Z D, LI J N, et al. Using an improved YoloV4 model to detect potatoes in complex environments [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 170-178.
- [44] 刘浩, 贺福强, 李荣隆, 等. 基于机器视觉的马铃薯自动分级与缺陷检测系统设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 73-78.
 LIU H, HE F Q, LI R L, et al. Design of potato automatic grading and defect detection system based on machine vision[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 73-78.
- [45] 许伟栋, 赵忠盖, 刘飞. 基于高通滤波的马铃薯机械损伤机器视觉检测[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 53-57+62.
 XU W D, ZHAO Z G, LIU F. Machine vision detection of potato mechanical damage based on high pass filtering[J]. Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 53-57+62.
- [46] BEYAZ A, GERDAN D. Potato classification by using ultrasonic sensor with LabVIEW[J]. Agricultural Science Digest-A Research Journal, 2020, 40(4): 376-381.
- [47] SUTRISNO R M F. Determination of the internal damage of purple sweet potatoes non-destructively using ultrasonic wave characteristics[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 147(1): 012002-012002.
- [48] ADEL H, MOHAMMAD H, KOMARIZADE, et al. High speed detection of potato and clod using an acoustic based intelligent system[J]. Expert Systems With Applications, 2011, 38(10): 12101-12106.
- [49] KONRAD W, NOWAK, MAREK M. Evaluation of selected properties of a gelatinized potato starch colloid by an ultrasonic method[J]. Measurement, 2020, 158(prepublish): 107717-107717.
- [50] 屠振华, 张成龙, 王瑶瑶, 等. 光电检测技术在马铃薯品质检测中的研究进展[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 8-13.
 TU Z H, ZHANG C L, WANG Y Y, et al. Research progress of photoelectric detection technology in potato quality detection [J]. Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 8-13.
- [51] 吴佳, 汤全武, 史崇升, 等. 马铃薯品质无损检测技术研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 257-260+271.
 WU J, TANG Q W, SHI C S, et al. Research progress on non-destructive testing technology for potato quality[J]. Food and Machinery, 2014, 30(3): 257-260+271.
- [52] 金凤, 李小昱, 汪成龙, 等. 马铃薯无损检测技术的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(22): 4974-4977.
 JIN F, LI X Y, WANG C L, et al. Research progress on non-destructive testing technology for potatoes[J]. Hubei Agricultural Science, 2012, 51(22): 4974-4977.
- [53] WANG L Y, MIAO Y L, HAN Y X, et al. Extraction of 3D distribution of potato plant CWSI based on thermal infrared image and binocular stereovision system[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 131104390-1104390.
- [54] 李玉华, 李天华, 牛子孺, 等. 基于色饱和度三维几何特征的马铃薯芽眼识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 158-164.
 LI Y H, LI T H, NIU Z R, et al. Potato bud recognition based on three-dimensional geometric features of color saturation[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 158-16.
- [55] 姜正, 朱广飞, 谢奇珍, 等. 我国粮食初加工机械化水平监测调查研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 91-97.
 LOU Z, ZHU G F, XIE Q Z, et al. Investigation and research on the monitoring and research of the mechanization level of grain primary processing in China[J]. Science and Technology Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 91-97.
- [56] 高琦, 孙铭阳, 袁兴铃, 等. 甘薯叶保鲜及加工利用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 143-151.
 GAO Q, SUN M Y, YUAN X L, et al. Research progress on preservation, processing and utilization of sweet potato leaves[J]. Science and Technology Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 143-151. ☉